

---

# Vorstellung eines photogrammetrischen Kamerasystems für UAV's mit hochgenauer GNSS/INS Information für standardisierte Verarbeitungsverfahren

THOMAS KRAFT, MATTHIAS GEBNER, HENRY MEIBNER, HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, MARKUS GERKE

## Zusammenfassung

Es werden die ersten Ergebnisse eines metrischen Luftbildkamarasystems für unbemannte Fluggeräte unter 5kg Abflugmasse vorgestellt. Der aktuelle Prototyp basiert auf dem vom DLR entwickelten „Modular Airborne Camera System“ (MACS) und dient als Flugmuster für die Verifizierung des Konzepts unter realen Einsatzbedingungen. Dazu wurde das Kamerasystem geometrisch kalibriert und ein erster Bildmessflug photogrammetrisch ausgewertet. Die Bewertung erfolgt anhand der Aerotriangulation aller Luftbildaufnahmen unter Verwendung von 32 Kontrollpunkten.

## 1 Einleitung

Unbemannte Trägersysteme (UAV) werden in den letzten Jahren vermehrt für photogrammetrische Bildmessflüge eingesetzt. Innerhalb der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) gab und gibt es eine rege Diskussion darüber, welche Verfahren zulässig sind und welche Spezifikationen erfüllt sein müssen, um von „UAV Photogrammetrie“ sprechen zu können.

Viele Anwender entscheiden sich bisher für den Einsatz leichter Consumer- oder Bridge-Kameras (wie Sony NEX 5R, Sony Alpha 7R, Fuji X-M1 oder Panasonic Lumix DMC-TZ71), deren Luftbildaufnahmen überwiegend mit Softwarelösungen aus dem Bereich der Computer Vision ausgewertet werden (z.B. Pix4D oder Agisoft Photoscan). Damit sind beeindruckende Ergebnisse für die Vermessung und Objektrekonstruktion möglich (CRA-MER ET AL., 2013; PRZYBILLA ET AL., 2015; NEX ET AL., 2015; HARWIN AND LUCIEER, 2012) und erreichbare Messgenauigkeiten wurden mehrfach durch verschiedene Arbeitsgruppen evaluiert. Jedoch ist die geometrische Stabilität dieser Sensoren selten gegeben und die durchschnittliche Aufnahmefrequenz von 1Hz verhindert einen effektiven Einsatz der unbemannten Träger. Bisher wurden lediglich vereinzelt metrische Luftbildkamarasysteme für UAV's vorgestellt (EHLING ET AL., MARTIN ET AL., 2014; BRAUCHLE ET AL., 2014; STEBNER AND WIEDEN, 2014), die sich an den Anforderungen konventioneller Luftbildkamarasysteme orientieren und eine klassische photogrammetrische Auswertung ermöglichen. Dazu muss die Innere Orientierung (IO) des Luftbildsensors bestimmt, deren Stabilität nachgewiesen, sowie die radiometrische Abbildungsleistung bewertet werden. Die erreichbaren Genauigkeiten können durch eine stringente photogrammetrische Luftbildauswertung anhand von verschiedenen Bildmessflügen nachgewiesen werden.

Aufgrund der rechtlichen Beschränkungen (BMVI, 2014) sollte zudem die Gesamtabflugmasse (MTOW) von 5kg nicht überschritten werden. Das Institut für Optische Sensorsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat dazu auf Grundlage des „Modular Airborne Camera System“ (MACS - LEHMANN ET AL., 2011) ein modulares Konzept für UAV's entwickelt, welches zukünftig den Aufbau von metrischen Luftbildkameras für verschiedene Anwendungen und Trägersysteme ermöglichen soll. Das Konzept erlaubt die Verwendung von hochwertigen Industriekomponenten und ermöglicht eine individuelle Anpassung des optischen Sensors, der GNSS und INS Lösung sowie der Embedded Hardware für den Bildeinzug und Betrieb. Es wurde ein erster Prototyp entwickelt um die Leistungsfähigkeit des Konzepts unter Beweis zu stellen. Dazu wurde ein Bildmessflug mit einem UAV unter 5kg MTOW durchgeführt und die möglichen Messgenauigkeiten durch eine photogrammetrische Auswertung validiert. Zudem wurde der Sensor mehrfach geometrisch kalibriert. Eine vereinfachte radiometrische Betrachtung erfolgt ebenfalls.

## 2 Kamerakonzzept

Eine metrische Kamera zeichnet sich in erster Linie durch die Kenntnis der Inneren Orientierung aus, die zudem während des Fluges unverändert bleibt. Diese kann durch die Verwendung von Industriekomponenten gewährleistet werden. Insbesondere bei den Kameramodulen steht eine Vielzahl von hochwertigen Sensoren mit definierten Schnittstellen zur Verfügung. Ebenfalls ist eine Vielzahl von Industrieoptiken mit Festbrennweiten verfügbar, bei denen Fokus und Blende mechanisch fixiert werden können.

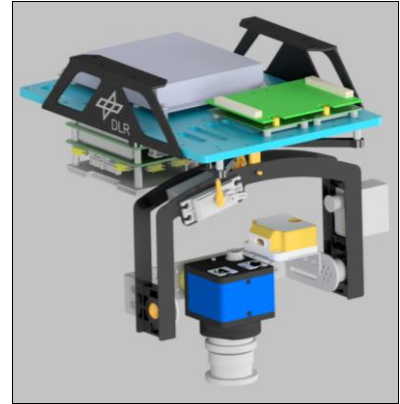
Für den aktuellen Prototyp (siehe Tabelle 1) kommt ein CMOS Sensor von OnSemiconductor zum Einsatz (KAC-12040, 4016x3016 Pixel, 4.7 $\mu$ m Pixelgröße, Bayer Pattern) der im Global Shutter Modus betrieben wird. Verwendet wird eine Industrieoptik von Schneider Kreuznach (APO Xenoplan f2.0 24mm), die mit dem Kameragehäuse mechanisch verbunden ist. Die Scharfstellung erfolgte auf einen Bereich von 20m bis 100m mit Blende 4.0. Fokus- und Blendenring sind ebenfalls mechanisch fixiert.

Für die Bestimmung der Näherungswerte für die Äußere Orientierung wird ein GNSS Zweifrequenz-Empfänger (Novatel OEM615) in Kombination mit einer hochwertigen MEMS-IMU (Sensor STIM300) verwendet. Die GNSS/INS Lösung erlaubt die Post-Prozessierung der Trajektorie. Kamera und MEMS-IMU sind miteinander fest verbunden und werden an einer Kamerastabilisierung betrieben, da für die Testflüge ein Multikopter zum Einsatz kommt.

Der Betrieb aller Komponenten erfolgt durch ein Embedded CPU Stack (Intel Atom Dual Core, 4GB RAM, Linux OS). Durch die definierten Schnittstellen können die Luftbildaufnahmen mit einer Genauigkeit unter 1 $\mu$ s den so verbesserten Navigationsdaten zugeordnet werden. Dazu werden alle Komponenten kontinuierlich gegen die hochgenaue GNSS Zeit synchronisiert. Der Bildeinzug erfolgt über eine GigE-Vision Schnittstelle mit der Bildraten von bis zu 4 Hz möglich sind. Alle Daten werden im RAW-Format auf einer wechselbare CFast-Karte (bis 256GB) gespeichert. Das Kamerasystem wird über ein handelsübliches Notebook konfiguriert. Der aktuelle Prototyp kann als autonome Payload betrieben werden und hat ein Gesamtgewicht von 1620g.

**Tabelle 1:** Komponenten des MACS-Micro Prototypen

Modul	Gewicht [g]
SVS EVO 12040 Kameramodul mit APO Xenoplan f2.0/24 (fixiert mit f4.0)	320
Novatel L1/L2 GNSS Receiver	110
Novatel L1/L2 GNSS Antenna	130
Sensoror STIM300 IMU	80
Embedded CPU Stack	350
Aktiv stabilisierter Gimbal	250
Power Management und Verkabelung	220
Payload Halterung	160

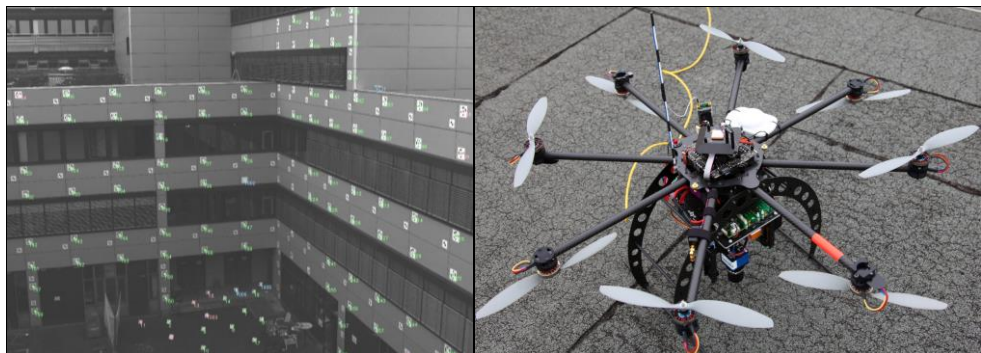


### 3 Kamerakalibrierung

#### 3.1 Geometrische Kalibrierung

Zur Bestimmung der Inneren Orientierung wurde die Messkamera auf dem dreidimensionalen Testfeld der Beuth Hochschule für Technik kalibriert. In diesem sind codierte Punktmarken auf zwei Fassaden eines Innenhofes aufgebracht (Abbildung 1), welche mittels geodätischem Vorwärtseinschnitt koordinativ bestimmt und in einem Netz ausgeglichen wurden. Die Standardabweichung der ausgeglichenen Passpunktkoordinaten beträgt 1.0 mm in jeder Dimension.

Das Testfeld wurde von neun verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen. Je Standpunkt erfolgten vier Aufnahmen für die Kantungen  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$ . Um eine gute Schnittgeometrie zu gewährleisten, wurden die Kamerastandpunkte so gewählt, dass diese das Testfeld aus verschiedenen Aufnahmeentfernungen, -winkeln und Höhenniveaus abbilden. Auf eine bildfüllende Verteilung der Passpunkte wurde ebenfalls geachtet.



**Abbildung 1:** Dreidimensionales Testfeld der Beuth Hochschule für Technik in Berlin (links) und MACS-Micro kurz vor dem Bildmessflug (rechts)

Unter Verwendung der Software Technet Pictran konnten im Zuge einer Bündelblockausgleichung die Parameter der Inneren Orientierung (Bildhauptpunkt ( $x_H$ ,  $y_H$ ), Kammerkonstante ( $c_k$ ), radial-symmetrische Verzeichnung ( $k_1$ ,  $k_2$ ), tangentielle Verzeichnung ( $p_1$ ,  $p_2$ )) signifikant bestimmt werden (siehe Tabelle 2). Durch die konvergenten Aufnahmen wurde eine geringe Korrelation zwischen den Parametern der IO erreicht. Zur Minimierung der manuellen Messfehler bei der Passpunktmessung wurde eine vorrausgehende automatisierte Messung der codierten Punktmarken durchgeführt. Nach erfolgtem Bildflug wurde die Messkamera erneut kalibriert. Die Aufnahmen erfolgten mit identischer Aufnahmekonfiguration entsprechend der ersten Kalibrierung um konfigurationsbedingt Einflüsse zu minimieren.

Wie in Tabelle 2 dargestellt, lagen die Abweichungen zu der vorangegangenen Kalibrierung im Maximum bei 0.15 Pixel in den Bildhauptpunktkoordinaten und bei 0.02 Pixel in der Kammerkonstante. Für die Verzeichnungsparameter konnten lediglich marginale Differenzen festgestellt werden. Damit konnte gezeigt werden, dass die Innere Orientierung über den Flug unverändert geblieben ist. Auf eine Selbstkalibrierung während der Bildflüge kann somit verzichtet werden.

**Tabelle 2:** Ergebnisse der geometrischen Kalibrierung

	Kalibrierung 22.10.2015		Kalibrierung 04.12.2015		Differenz
	Wert	RMS	Wert	RMS	
$c_K$ [mm]	24,2149	0,0007	24,2147	0,0007	0,0002
$x_H$ [mm]	-0,1842	0,0008	-0,1809	0,0007	-0,0034
$y_H$ [mm]	0,0748	0,0006	0,0724	0,0006	-0,0024
$R_0$ [mm]	7,0781	-	7,0781	-	-
$K_1$	-1,996E-04	2,40E-07	-1,996E-04	2,14E-07	-4,700E-08
$K_2$	3,682E-07	1,81E-09	3,676E-07	1,60E-09	5,480E-10
$P_1$	1,450E-05	3,66E-07	1,576E-05	3,51E-07	-1,256E-06
$P_2$	-6,251E-06	3,11E-07	-7,627E-06	2,95E-07	1,376E-06

### 3.2 Radiometrische Korrekturen

Um auftretende Abbildungsfehler der Messkamera korrigieren zu können wurde die Dark Signal Non-Uniformity (DSNU) [BECKER ET AL, 2008] und die Photo Response Non-Uniformity (PRNU) bestimmt.

Die DSNU wurde bei einer Raumtemperatur von 20°C gemessen. Dazu wurden fünf Aufnahmen pro Belichtungszeit (200µs, 400µs, 800µs und 1600µs) durchgeführt. Der Offset des Analog/Digital-Wandlers des CMOS Chip im Global-Shutter Modus (KAC-12040C<sup>1</sup>) wurde auf 358DN bestimmt. Die Standardabweichung lag bei 224DN. Beide Werte bein-

<sup>1</sup> [www.onsemi.com/pub/Collateral/KAC-12040-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub/Collateral/KAC-12040-D.PDF) (20.01.2016)

---

halten das Rauschen des Sensors zum Zeitpunkt der Aufnahme. Da der Sensor zum verstärkten Rauschen in dunklen Bereichen tendiert, sollten Unterbelichtungen vermieden werden.

Die PRNU wurde mit einem „natural light LED“ Display von CSS<sup>2</sup> bestimmt. Das Display hat eine Farbtemperatur von 5000 Kelvin und erreicht ein Color Rendering Index Level (CRI) von 98. Es wurden drei Aufnahmen pro Belichtungszeit (100µs, 250µs, 500µs, 1000µs und 1500µs) aufgenommen und das Display wurde dabei gedreht (0°, 30°, 90°). Die Aufnahmen erfolgten formatfüllend bei einer Raumtemperatur von 20°C.

Auf Grundlage der Aufnahmen wurden ein Offset-Bild (als Ergebnis der DSNU) und ein Faktor-Bild (als Ergebnis der PRNU) erstellt. Damit können objektivbedingte Einflüsse wie Vignettierung sowie sensorbedingte radiometrische Inhomogenitäten in den späteren Luftbildaufnahmen korrigiert werden.

## 4 Flugkampagne

Der Jungfernflug des Prototyps erfolgte Ende Oktober 2015 auf dem DLR Campus in Berlin-Adlershof mit einem unbemannten Oktokopter unter 5kg MTOW. Im Zentrum des Fluggebietes befindet sich ein Gebäudekomplex mit einer Ausdehnung von 30x30m und einer Höhe von 12m. Dieser ist umgeben von weiteren Gebäuden, versiegelten Flächen und Grünflächen. Auf einer Ausdehnung von 80x70m wurden 39 Passpunkte vermarkt (19 am Boden und 20 auf den Dächern). Diese wurden tachymetrisch eingemessen und die Genauigkeiten der Passpunkte belaufen sich auf 3mm in der Lage und 2mm in der Höhe.

Der Bildflug erfolgte nach folgenden Parametern, bezogen auf den Boden:

Flugmuster	alternierend, Kreuzbefliegung (Abbildung 2)
Bildüberlappung (längs/quer)	90% und 75%
Auflösung am Boden (GSD)	1.1cm (nativ)

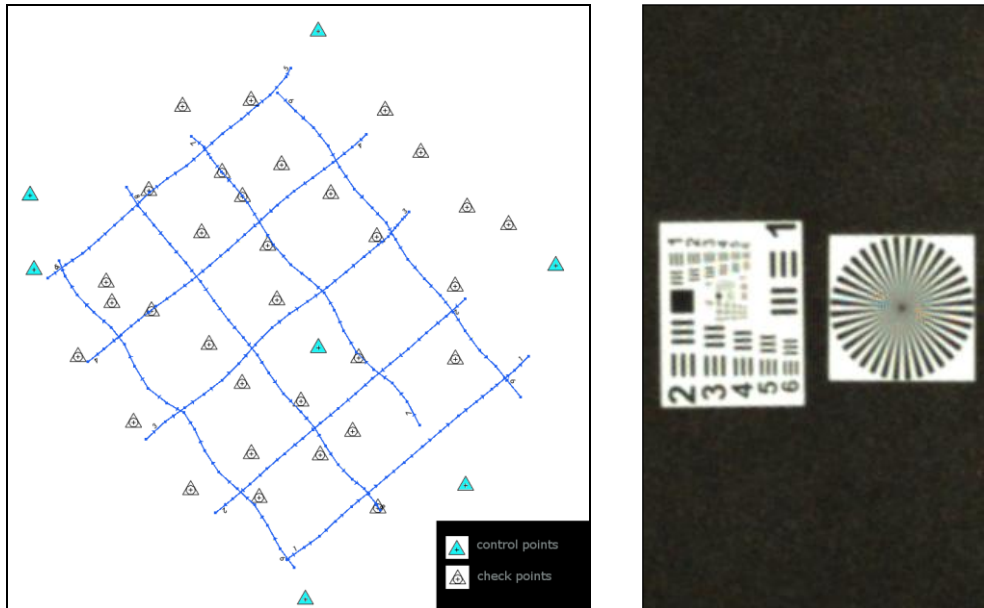
Die Flughöhe über Grund lag bei 55m, bei einer Flugeschwindigkeit von 4m/s, einem Flugstreifenabstand von 15m und einer Aufnahmezeit von 1Hz. Auf Grund von Bewölkung wurde eine Belichtungszeit von 1500µs gewählt. Für die vorgegebenen Flugstreifen wurden 155 Nadiraufnahmen erfasst. Die Konvertierung der Rohbilder in das TIFF-Format erfolgte unter Berücksichtigung der Parameter für DSNU und PRNU. Das Debayering erfolgte mit einem bilinearen Interpolationsverfahren. Durch die Auswertung eines Siemenssterns und einer 1951-USAF Testtafel konnte eine reale Bodenauflösung von 1,6cm ermittelt werden.

Die aufgezeichneten Rohdaten des GNSS-Empfängers und der IMU wurden unter Verwendung des Korrekturdatendienst SAPOS post-prozessiert. Dies erfolgte mit der Software Inertial Explorer<sup>3</sup> und den Einstellungen für den klassischen Luftbildflug. Über den GNSS-Zeitstempel wurden diese korrigierten Navigationsdaten den Luftbildern nachträglich zugeordnet.

---

<sup>2</sup> TH-224X1170W50 (custom-built LED flat field) - [www.ccs-grp.com/ledline/002.html](http://www.ccs-grp.com/ledline/002.html) (20.01.2016)

<sup>3</sup> [www.novatel.com/products/software/inertial-explorer/](http://www.novatel.com/products/software/inertial-explorer/) (20.01.2016)



**Abbildung 2:** Flugmuster und Verteilung der Passpunkte im Fluggebiet (links) und 1951 USAF Testtafel und Siemensstern (rechts)

## 5 Photogrammetrische Auswertung

Die Aerotriangulation (AT) wurde unter Verwendung der bestimmten Inneren Orientierung (vom 22.10.2015 - Kapitel 0), den post-prozessierten Navigationsdaten und den 155 post-prozessierten Luftbilddaufnahmen in Trimble MatchAT berechnet. Sämtliche 39 Passpunkte wurden im ersten Schritt manuell gemessen und mittels Least-Square-Matching verbessert.

Die AT wurde auf Grundlage von 7 Passpunkten und 32 Kontrollpunkten berechnet. Die Verteilung der Punkte ist in Abbildung 2 dargestellt. Die RMS Werte an den Checkpunkten lagen bei 0.7 GSD in der Lage sowie 0.3 GSD in der Höhe. In der AT wurden die Winkeldifferenzen (boresight misalignments) zwischen IMU- und Kamera-Koordinatensystem initial bestimmt und können bei zukünftigen Bildmessflügen in die Post-Prozessierung der Trajektorie einbezogen werden. Um die erreichte Qualität der Navigationslösung zu verdeutlichen, wurden eine weitere AT ohne Passpunkte berechnet. Wie in Tabelle 4 dargestellt, konnte eine Genauigkeit von 0.6 GSD in der Lage und 1.2 GSD in der Höhe ermittelt werden.

## 6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung des ersten Testflugs und die geometrische Kalibrierung der Kamera vor und nach dem Flug zeigen, dass der Prototyp bereits viele Anforderungen eines klassischen Luftbildkamerasystems erfüllt.

Die Luftbildaufnahmen können mit etablierten Software-Produkten verarbeitet werden und die Stabilität der Inneren Orientierung konnte mit zwei geometrischen Kalibrierungen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der AT zeigen, dass Genauigkeiten von terrestrischen GNSS Messverfahren erreicht werden. Die geometrische Stabilität der Messkamera muss durch weitere Messungen validiert werden. Darüber hinaus sind die erreichbaren Messgenauigkeiten durch weitere Testflüge unter Beweis zu stellen. Der aktuelle Prototyp dient als Ausgangsbasis und kann mit unbemannten Fluggeräten unter 5kg eingesetzt werden. Durch das modulare Konzept soll schrittweise eine Konfiguration gefunden werden, die verschiedenen Ansprüchen aus der Wissenschaft und Wirtschaft gerecht wird.

**Tabelle 3:** AT Ergebnis (7 Passpunkte und 32 Kontrollpunkte)

<b>Beobachtung</b>	<b>Standardabweichung a-priori</b>	<b>Standardabweichung a-posteriori (RMS)</b>
GNSS	$X = Y = Z = 0,02\text{m}$	X = 0,016m Y = 0,018m Z = 0,009m
IMU	$\omega = \phi = \kappa = 0,050^\circ$	$\omega = 0,043^\circ$ $\phi = 0,048^\circ$ $\kappa = 0,053^\circ$
Verknüpfungspunkte	$x = y = 1\mu\text{m}$	$x = y = 0,6\mu\text{m}$
Manuell gem. Punkte (+LSM)	$x = y = 1\mu\text{m}$	x = 0,7 $\mu\text{m}$ y = 0,6 $\mu\text{m}$
Passpunkte (7)	XY = 0,007m Z = 0,005m	XY = 0,013m (0,8 GSD) Z = 0,007m (0,4 GSD)
Kontrollpunkte (32)	XY = 0,007m Z = 0,005m	XY = 0,011m (0,7 GSD) Z = 0,005m (0,3 GSD)
Sigma naught		0,6 $\mu\text{m}$ (0,1 GSD)

**Tabelle 4:** AT Ergebnis (0 Passpunkte und 39 Kontrollpunkte)

<b>Beobachtung</b>	<b>Standardabweichung a-priori</b>	<b>Standardabweichung a-posteriori (RMS)</b>
GNSS	$X = Y = Z = 0,02\text{m}$	X = 0,016m Y = 0,017m Z = 0,007m
IMU	$\omega = \phi = \kappa = 0,050^\circ$	$\omega = 0,044^\circ$ $\phi = 0,048^\circ$ $\kappa = 0,053^\circ$
Verknüpfungspunkte	$x = y = 1\mu\text{m}$	$x = y = 0,6\mu\text{m}$
Manuell gem. Punkte (+LSM)	$x = y = 1\mu\text{m}$	x = 0,7 $\mu\text{m}$ y = 0,6 $\mu\text{m}$
Kontrollpunkte (39)	XY = 0,007m Z = 0,005m	XY = 0,015m (0,9 GSD) Z = 0,019m (1,2 GSD)
Sigma naught		0,6 $\mu\text{m}$ (0,1 GSD)

## Literatur

- Brauchle, J., Rüther-Kindel, W., Berger, R. (2014): *MACS-TumbleCam - A Novel Approach for Aerial Oblique Imaging*. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2014 (4), pp. 253-263. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.
- Cramer, M., Haala, N., Rothermel, M., Leinss, B. & Fritsch, D. (2013): *UAV-gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF), Tagungsband 22, pp. 450-469.
- Becker, H.N., Dolphin, M.D., Thorbourn D.O., Alexander, J.W. Salomon, P.M. (2008): *Commercial Sensor Survey. Radiation Testing Progress Report*. Jet Propulsion Laboratory California, Institute of Technology Pasadena, California. JPL Publication 08-22 4/08.
- Harwin, S., Lucieer, A. (2012): *Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery*. Remote Sensing, 2012 (4), No. 6, pp. 1573-1599.
- Eling, C., Wieland, M., Hess, C., Klingbeil, L., and Kuhlmann, H. (2015): *DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A UAV BASED MAPPING SYSTEM FOR REMOTE SENSING AND SURVEYING APPLICATIONS*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-1/W4, 233-239, isprsarchives-XL-1-W4-233-2015, 2015.
- BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014): *Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen*. [www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LF/unbemannte-luftfahrtsysteme.pdf](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LF/unbemannte-luftfahrtsysteme.pdf) (01. Jan 2014).
- Lehmann, F., Berger, R., Brauchle, J. Hein, D., Meißner H., Pless, S. (2011): *MACS - Modular Airborne Camera System for generating photogrammetric high-resolution products*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 2011 (6), pp. 435-446. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.
- Martin, O., Meynard C., Pierrot-Deseilligny M., Souchon J.-P., Thom Ch. (2014): *Réalisation d'une caméra photogrammétrique ultralégère et de haute résolution*. Colloque Drones et moyens légers aéroportés d'observation, Montpellier, France, 24-26 Juin 2014, to be published in RFPT.
- Nex, F., Gerke, M., Remondino, F., Przybilla H.-J., Bäumker, M., Zurhorst, A. (2015): *ISPRS Benchmark for Multi-Platform Photogrammetry*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. II-3/W4, pp.135-142.
- Przybilla, H.-J., Reuber, C., Bäumker, M., Gerke, M. (2015): *Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF), Tagungsband 24, pp. 45-54.
- STEBNER, K., WIEDEN, A. (2014): *Accuracy analysis for automatic orientation of a tumbling oblique viewing sensor system*. EuroCOW 2014, European Calibration and Orientation Workshop, 12–14 February 2014, Castelldefels, Spain.



---

Kraft, Thomas

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut Optische Sensorsysteme

[Thomas.Kraft@dlr.de](mailto:Thomas.Kraft@dlr.de)

Geßner, Matthias

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut Optische Sensorsysteme

[Matthias.Gessner@dlr.de](mailto:Matthias.Gessner@dlr.de)

Meißner, Henry

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut Optische Sensorsysteme

[Henry.Meissner@dlr.de](mailto:Henry.Meissner@dlr.de)

Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla

Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie

[heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de](mailto:heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de)

Dr.-Ing. Markus Gerke

University of Twente, Department of Earth Observation Science (ITC-EOS)

[m.gerke@utwente.nl](mailto:m.gerke@utwente.nl)